

杜骧,周宁,韩永翔,等,2019.河南省一次冻雨过程中电线积冰厚度模拟[J].气象,45(5):641-650. Du S, Zhou N, Han Y X, et al, 2019. Simulation of wire ice thickness during a freezing rain process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 45(5):641-650 (in Chinese).

河南省一次冻雨过程中电线积冰厚度模拟^{*}

杜 骧¹ 周 宁² 韩永翔¹ 李 哲² 陆正奇¹ 龚建福¹ 刘唯佳¹

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,中国气象局气溶胶-云-降水
重点开放实验室,南京 210044

2 国网河南省电力公司电力科学研究院,郑州 450018

提 要: 利用 WRF 中尺度数值模式并耦合 Jones 积冰厚度模型,对河南省 2010 年 2 月 8—11 日的冻雨过程进行了大气环流分析以及电线积冰厚度的模拟。研究结果显示:(1)在河南大部和安徽北部,冷暖气团在此交汇且出现强逆温层,满足了冻雨产生的天气条件;(2)模拟的降水场和 10 m 高度风向风速均与观测相当,但模拟降水中心强度略大;(3)模拟电线积冰在地面温度低于 0℃时出现并快速增长。在积冰增长及维持阶段,垂直方向温度与水合物的模拟结果显示高低空配置与积冰厚度的变化趋势相吻合。积冰首先出现在伏牛山以北地区,随时间推移,积冰向伏牛山外围的东南部扩展。模拟的范围和积冰厚度演变大体上与观测值吻合,证明该模式可用于河南地区的积冰预测。(4)部分地区仍存在积冰厚度模拟值偏大的现象,其原因可能来自地形模拟精度较粗、模拟风速偏大、风向与电线夹角理想化以及 Jones 积冰模型阈值范围较小等因素,这表明耦合了 Jones 积冰厚度的 WRF 模式虽然有一定的模拟能力,但仍需要进一步改进。

关键词: 电线积冰厚度, WRF 模式, 中尺度模拟, 覆冰增长模型

中图分类号: P426, P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.005

Simulation of Wire Ice Thickness During a Freezing Rain Process in Henan Province

DU Shuang¹ ZHOU Ning² HAN Yongxiang¹ LI Zhe² LU Zhengqi¹

GONG Jianfu¹ LIU Weijia¹

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for
Aerosol-Cloud-Precipitation of CMA, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018

Abstract: The atmospheric circulation analysis and ice thickness simulation are conducted to the freezing rain process in Henan Province in 8—11 February 2010 by using the Weather Research and Forecasting (WRF) mesoscale numerical model coupled with the Jones ice thickness model. The results show that: (1) The emergence of an intense inversion layer and the mixing of cold and warm air masses above Henan and northern Anhui reached the freezing weather conditions. (2) The simulated precipitation and 10 m wind direction and wind speed were similar to the observed values, but the intensity of the simulated precipitation center was slightly larger. (3) The simulated wire ice accretion appeared and developed rapidly when the surface temperature went below 0℃. In the icing growth and maintenance phase, the vertical

^{*} 国家自然科学基金项目(41375158)资助

2018 年 1 月 20 日收稿; 2019 年 1 月 3 日收修定稿

第一作者: 杜骧, 主要从事大气物理与大气环境研究. Email: dushuang90@hotmail.com

通信作者: 韩永翔, 主要从事气候变化、气溶胶环境效应研究. Email: han-yx66@126.com

temperature and hydrate simulation results show that the height and low altitude configuration is consistent with the change trend of ice thickness. Ice accretion first appeared to the north of Funiu Mountain, and then extended to the southeast. The evolution of the simulated ice range and the thickness of the wire ice accretion generally coincided with the observed data, which proves that this model can be applied to the prediction of ice accumulation in Henan Province. (4) The simulated ice thickness was too large in some areas, which might be attributed to many reasons, for example, as simulation demands highly accurate terrain data, the simulated wind speed is too large, the angle between the wind direction and the electric wire is ideally assumed, and the threshold range of the Jones ice model is narrowed. Although the WRF model of ice thickness has some capability in the simulation of wire ice accretion, it still needs further improvement.

Key words: wire ice thickness, WRF model, mesoscale numerical simulation, ice load model

引 言

电力工业是保障国民经济快速、健康发展的动力引擎,随着国家电网交流 1000 kV 和直流 ± 800 kV 特高压电网的建设,由雨淞、雾淞等过冷水凝结在导线上所形成的电线覆冰所引发的电线断裂、电塔倒塌及舞动事故不但导致电网巨大损失(李庆峰等,2008),而且对国民经济的发展产生重大影响,如 2008 年南方地区历史罕见的低温雨雪冰冻灾害天气,导致江西、浙江、湖北、云南、贵州等地区电线出现 50 年一遇的积冰厚度,此次灾害造成了南方电网区域 4216 条输电线路被破坏,10~110 kV 线路倒塔 14 万多基,220 kV 以上线路倒塔 1500 多基,直接经济损失达 1100 多亿元,灾后重建和修复改造需要资金高达 390 亿元,并导致交通(公路、铁路、民航等)停运,受灾人口达 1 亿多人,对我国国民经济造成了巨大损失(王凌等,2008;苑吉河等,2004;胡毅,2008;钱之银等,2008)。

目前国内外对积冰的研究主要集中在电线积冰的成因方面,根据研究认为积冰形成所需的气象因素主要有几方面:(1)大气环流的持续性异常是冻雨天气过程的重要形成原因之一;中纬度阻塞高压的长时间维持,导致冷空气和暖湿空气持续向中国大陆输送,给冻雨的形成提供了有利条件(赵思雄和孙建华,2008;孙建华和赵思雄,2008;叶成志等,2009;吴古会等,2012)。(2)准静止锋是产生冻雨天气的重要天气系统。暖湿空气在锋面附近聚集,对冻雨天气的产生、发展及维持有重要影响作用(陶祖钰等,2008;Sun and Zhao,2009)。(3)冻雨的形成也受到一些关键性因素的影响,如 $-3\sim-1^{\circ}\text{C}$ 的地面

温度、高空暖层以及近地面逆温层的存在等(Brooks,1920;Stewart,1992;Cortinas et al,1917;Houston and Changnon,2007;周光歧,1996;周后福等,2004;王晓兰等,2006;宗志平和马杰,2011;康丽莉等,2017)。(4)空气湿度和地面风速也是非常重要的冻雨形成因素(蒋兴良和易辉,2002)。

相对电线积冰的成因而言,电线积冰厚度的研究相对比较薄弱。积冰厚度是指在导线切面上垂直于积冰直径方向上冰层积结的最大数值线。尹宪志等(2013)根据电线积冰观测资料,对积冰与气温、水汽压、风速等气象要素的关系进行了分析,认为电线积冰量随高度增加而增加,随电线直径增大而增大,与风向有关系,积冰量与水汽压、风速分别呈正相关和反相关。邓芳萍等(2017)建立了基于常规气象资料的小时标准冰厚模型,并模拟了 2008 和 2013 年浙江省两次严重积冰灾害的标准冰厚,模拟结果能较好地反映标准冰厚的时空分布规律及变化趋势。周悦等(2014)利用耦合 Thompson 参数化物理方案的 WRF(Weather Research and Forecasting)模式对恩施雷达站三处积冰过程的边界层特征及云雾微物理量进行了模拟,模拟结果与观测基本相符。电线积冰的增长模型目前也有许多,例如,认为单位时间单位长度上雨淞量与空气温度成反比、与降水强度无关的 Imai 模型(Imai,1953)、忽略其他因素影响仅取降水量作为覆冰量计算参数的 Lenhard 模型(Lenhard,1995)、基于经验公式的 Chaîne 模型(Chaîne and Casfonguay,1974)、Sakamoto(2000)提出的半经验积雪型模型等,但这些模型要么是局地性较强的经验模型,要么需要的气象要素过于理想化,难以满足实际的业务需求。值得注意的是 Jones(1998)发展的积冰模型,当确定发生冻雨时,

它仅以风速、降水量和液态水含量等易于获取的物理量作为输入值,进而对积冰厚度值进行模拟,它以计算简便、效果较好而被广泛应用。目前 Jones 的积冰模型常用于单点的积冰厚度预测,如何将其耦合进中尺度的 WRF 模式,进而进行区域的积冰厚度预测,以满足电力部门对区域电线积冰灾害量化预报的迫切需求是值得研究的。

2010 年 2 月 8—11 日,受北方较强冷空气和南方暖湿气流的共同影响,我国中东部自北向南出现了大面积的冰冻雨雪天气,并在河南、湖北和安徽形成了电线积冰灾害。本文通过大气环流分析,进而利用耦合了 Jones 积冰模型的 WRF 模式,试图模拟此次过程的电线积冰厚度并与实际观测进行对比分析,探讨耦合了 Jones 积冰模型的 WRF 模式能否比较准确地预测区域电线积冰厚度的可能性及出现误差的原因,这一研究结果有助于对电线积冰的成因及厚度预测的理解。

1 数据及模式介绍

1.1 数据来源

气象数据来源于国家气候中心,河南省国家电网提供了 110 kV 以上线路的电线积冰厚度数据。FNL 资料来自 NCAR/NCEP 的再分析资料(<https://rda.ucar.edu>)。

1.2 WRF 模式简介

WRF 模式是 NCAR/NCEP 开发建设的新型高分辨率中尺度气象数值模式,它在各类天气情况及中小尺度模拟中具有较好模拟效果(王晓君和马浩,2011)。本文采用 WRF3.6.1 模式,以 6 h 一次 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 FNL 再分析资料作为初始条件,采用 2 层嵌套(图 1),第一层以河南省为中心,网格水平间距为 27 km,格点数为 80×80 ;第二层以郑州为中心,包括河南省,网格水平间距为 9 km,格点数为 100×100 ,垂直方向为 43 层。具体的物理方案采用 RRTM 长波辐射方案,Dudhia 短波辐射方案,近地面层 Monin-Obukhov 方案,Noah 陆面过程方案,YSU 边界层参数化方案,微物理过程采用 Thompson 方案,两层嵌套都使用了 Kain-Fritsch 积云对流方案。

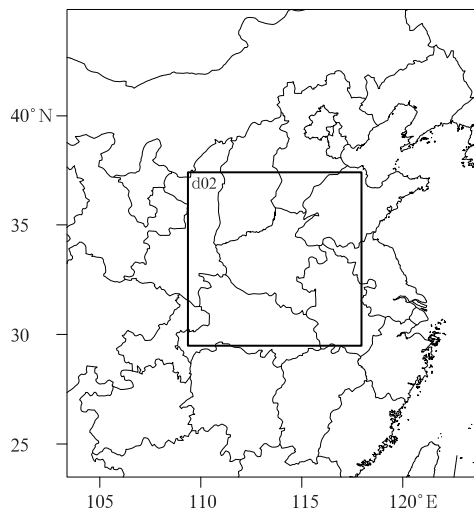


图 1 WRF 模式模拟区域图

Fig. 1 WRF model simulation area

模拟时间为 2010 年 2 月 8 日 20 时至 11 日 20 时。

1.3 电线积冰模型

电线积冰模型分为冻雨的判定与积冰厚度增长及融化三个部分。

(1) 冻雨的判定:当降水形成层高度处的湿球温度 $T_w \geq -6.6^\circ\text{C}$ 或者从地面到该层温度廓线中有一点 $T_w \geq 0^\circ\text{C}$,同时 IF 值(冰相降水与总降水量的比值)介于 $0 \sim 0.85$,且地表温度 $T_w < 0^\circ\text{C}$ 时,判断为冻雨。只有降水类型为冻雨时才会启动冻雨覆冰机制,降水类型为雪或雨夹雪时覆冰状态将处于维持阶段,降水类型为雨时覆冰将处于融化状态(Ramer,1993)。

(2) 出现冻雨后, Jones 的雨淞等效冰厚模型公式:

$$Req = \sum_i \frac{1}{0.001\rho_i\pi} [(0.001P_i\rho_w)^2 + (3600V_iW_i)^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中, Req 为雨淞增长的冰厚(单位: mm), P_i 为单位时间内的降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ_w 为水的密度($1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ_i 为冰的密度($0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), V_i 为风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), W_i 为降水时的液态含水量(单位: mm): $W_i = 0.067P_i^{0.846}$ 。

(3) 当地面温度回升至 0°C 及以上且无冻雨产生时,启动积冰融化公式(Farzaneh and Savadjiev, 2005):

$$dM = -0.087 - 0.08T$$

式中, T 为当前时刻的气温, dM 为单位时间内覆冰融化的质量(单位: kg)。

本文利用了 WRF 模式进行模拟, 然后将所选区域的模拟温度、风速等气象要素逐时输出带入 Jones 模型计算积冰的厚度。

2 结果分析

2.1 大气环流分析

2010 年 2 月 8—11 日, 由于受北方较强冷空气和南方暖湿气流的共同影响, 我国中东部自北向南出现了大面积的冰冻雨雪天气。从地面冷锋、地面 0°C 等温线及 850 hPa 切变线移动示意图(图 2)可知, 冷锋 8 日到达河套、华北一带, 9 日冷锋影响到淮河以北的大部分地区, 10 日冷锋移过长江; 地面 0°C 线 9 日位于黄河一线, 10 日已南压到江苏北部、安徽北部、河南南部到湖北一带, 11 日则已移过长江, 长江以北进入冰冻天气; 850 hPa 切变线在 8 日加强东移横扫我国中东部地区, 将槽前暖湿的偏西南气流向中东部输送, 它与乌拉尔山东移南下的冷空气在我国中部地区交汇, 形成了大面积的雨雪天气。根据 850 和 700 hPa 0°C 等温线的位置, 可大体求出区域的逆温区(图 3), 从图中可以看到, 10 日大面积的逆温区出现在河南大部及安徽北部, 随后逐渐南移, 11 日大面积逆温区出现在长江中下游流域, 逆温区的出现使上部的固体粒子在掉落过程中融化形成液体的雨滴, 落入近地面冷层中, 形成过冷却雨滴, 当接触到空中的电线时产生积冰现象。

2.2 降水量的模拟与对比分析

根据 Jones 积冰增长模型, 降水量在积冰厚度

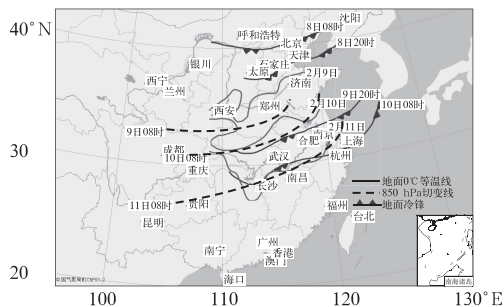


图 2 2010 年 2 月 8—11 日地面冷锋及 0°C 等温线、850 hPa 切变线

Fig. 2 Ground cold front and 0°C isotherm, shear line at 850 hPa in 8—11 February 2010

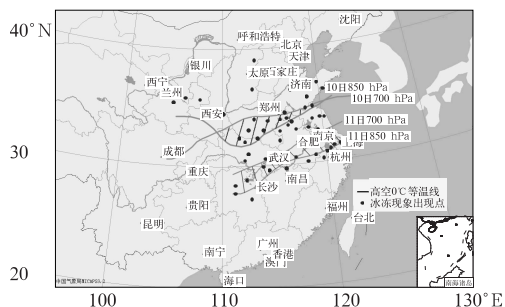


图 3 2010 年 2 月 10—11 日冰冻事件中的逆温区(阴影)和站点(圆点)

Fig. 3 Inversion zone (shaded area) and the stations (dot) with freezing events in 10—11 February 2010

模拟中是关键因素之一。8 日 20 时至 11 日 20 时模拟的 24 h 累计降雨量与观测(图 4)显示, 8 日 20 时至 9 日 20 时, 模拟有两个降水中心(图 4a)分别位于河南南部与安徽、湖北交界处附近以及在河南北部的安阳市附近, 模拟河南南部降水中心及范围与观测大体一致(图 4d), 但降水中心强度模拟值 $>12\text{ mm}$, 超过观测的 $6.4\sim12.8\text{ mm}$; 模拟的安阳市降水中心范围与观测一致, 但是模拟降水强度仍然较大。9 日 20 时至 10 日 20 时, 模拟有两个降水中心(图 4b)分别在驻马店市以南的河南东南部地区以及河南西北部的洛阳一带。模拟的驻马店市以南的雨带与观测实况基本一致, 大致呈东北—西南走向, 但是模拟最大降水强度仍然偏大, 然而对于驻马店附近区域的模拟降水量略小于观测值; 洛阳附近的降水中心模拟位置较偏南, 降雨强度模拟值略大(图 4e)。10 日 20 时至 11 日 20 时, 模拟降水有一个强中心及一个较强中心(图 4c): 强中心位于河南南部与安徽交界处, 较强中心位于伏牛山外围东面。该日降水已逐渐向东南方向转移消退, 模拟降水中心已位于湖北与安徽交界处, 模拟最大强度与观测较一致(图 4f), 但信阳及以南地区的整体降水强度模拟值略小于观测值。

2.3 出现电线积冰时风场模拟分析

研究表明风对电线积冰起着重要的作用, 它将大量过冷水滴向线路输送, 与电线碰撞从而迅速增大覆冰厚度(王守礼, 1994)。当具备形成积冰的温度与水汽条件后, 风速的大小与方向是决定积冰大小的重要参数。同时, 风向与导线垂直时容易产生

较严重的电线积冰。

利用 WRF 模式对该时段的风场逐小时进行模拟,每隔 6 h 输出一模拟结果,10—11 日 8 个时间段的风场基本一致(图略)。本文以 10 日 08 时为

例,模拟的河南风向以东北为主,与河南大部分地区观测值较吻合。在出现积冰现象的站点,模拟地面 10 m 风速大多在 $10 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5b),略大于观测风场(图 5a);同时驻马店以南地区观测风向

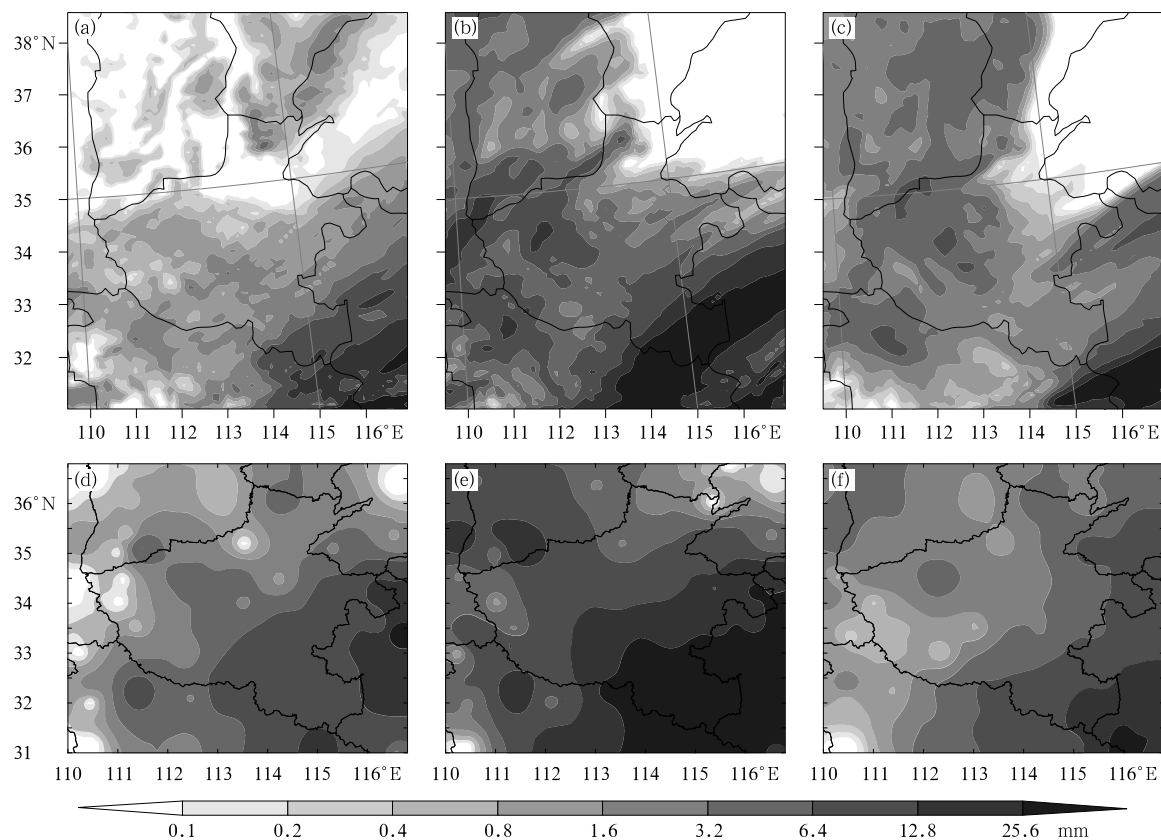


图 4 2010 年 2 月 8 日 20 时至 11 日 20 时的 24 h 累计降雨量模拟值(a,b,c)与观测值(d,e,f)
(a,d)8 日 20 时至 9 日 20 时,(b,e)9 日 20 时至 10 日 20 时,(c,f)10 日 20 时至 11 日 20 时

Fig. 4 Simulations (a, b, c) and observations (d, e, f) of the 24 h accumulated precipitation
from 20:00 BT 8 to 20:00 BT 11 February 2010

(a, d) 20:00 BT 8 to 20:00 BT 9, (b, e) 20:00 BT 9 to 20:00 BT 10, (c, f) 20:00 BT 10 to 20:00 BT 11

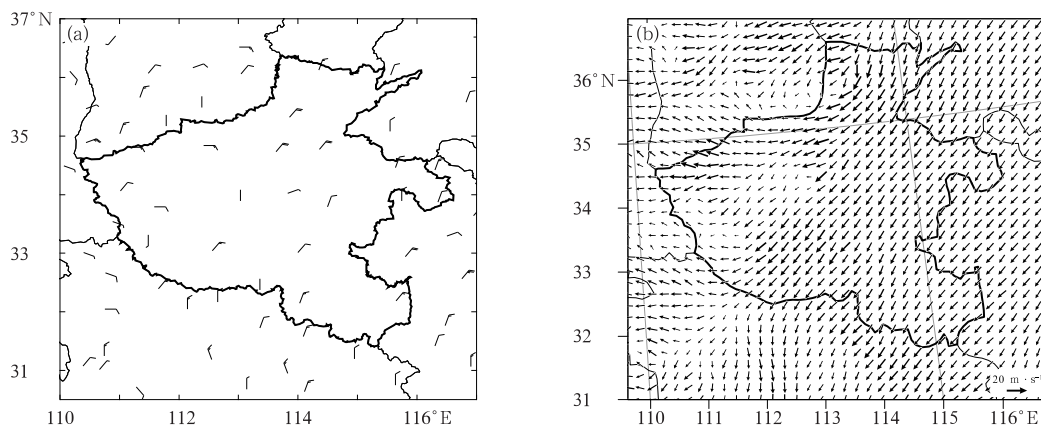


图 5 2010 年 2 月 10 日 08 时地面 10 m 风场观测值(a)与模拟值(b)

Fig. 5 Observation (a) and simulation (b) of the 10-meter wind field
at 08:00 BT 10 February 2010

为偏北风,存在一定偏差。

2.4 积冰厚度模拟分析

利用 WRF 模式对该地区该时段的基本气象要素及微物理量进行了模拟,并将其带入 Jones 模型进行计算,模拟了 2010 年 2 月 8—11 日漯河和许昌电线积冰随时间的具体变化过程及动态的积冰厚度(图 6),漯河(图 6a)和许昌(图 6b)地面温度均在 10 日 02 时前后逐渐降低到 0°C 以下,开始出现积冰;随着地面温度的降低,积冰厚度快速增长,在 11 日 10 时左右达到最大,如许昌积冰厚度达 7.9 mm,然后厚度不再增加;到 14 时左右,地面温度达到 0°C 以上,积冰快速融化。

本文选取积冰较严重的区域如漯河为中心点(33.53°N 、 113.95°E)做了其纬向和经向水成物组分及温度垂直分布剖面(图 7),以 10 日 15 时(积冰增长速度快)和 11 日 02 时(积冰不再增长)为例,研究逆温、过冷却水分布及演变对积冰的影响。在 10 日 15 时,纬向剖面(图 7a)显示 $112^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ 的地面温度约在 $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$,其上 600~900 hPa 整层区域存在较强的逆温层,逆温区的暖层呈现由西向东不断增厚的趋势;同时在漯河逆温区内存在大量的液态水成物,其最大值可到 $0.35\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。径向垂直剖面(图 7b)显示逆温区出现在漯河的南部上空的 900~650 hPa,越往南逆温越强。同时逆温区内 700 hPa 有大量液体水成物的聚集,在此区域形成暖雨区,通过凝结、碰并等形式形成降水,雨滴在通过近地面的一 $8\sim -4^{\circ}\text{C}$ 的冷区中冷却形成过冷却水,与低于 0°C 的电线接触形成积冰。另外,有少量

固态水成物的存在,因此在冻雨过程中可能夹杂冰晶等固态降水。积冰不再增长的 11 日 02 时,图 7c、7d 中均显示逆温层已消失,温度随高度升高而不断降低,而高空的液态及固体水成物也消失,在没有逆温层及液态水成物的存在下,积冰厚度不再增长。

图 8 为 10 日 02 时至 11 日 08 时等 6 个时次模拟的空间最大积冰厚度演变图,积冰主要出现在 $31^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$,在此区域中,除陕西、河南和湖北三省交界的伏牛山区没有发生积冰外,积冰主要围绕伏牛山外围逐渐向北、东和南部扩展。10 日 02 时(图 8a),积冰首先出现在伏牛山以北($34^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$),积冰较厚的区域在崤山一带,最大模拟积冰厚度大致在 10~15 mm。随时间推移,08—14 时,积冰向伏牛山外围的东南部扩展(图 8b、8c),东部扩展至河南东部的商丘一带,向南延伸至信阳等地区,河南中部大部分地区出现积冰现象;同时在伏牛山外围的北部和东南部积冰强度增强,模拟最大积冰厚度分别达 20~25 和 15~20 mm。10 日 20 时到 11 日 08 时(图 8d~8f),积冰主要向伏牛山外围的南部扩展,同时积冰中心也向南偏移,积冰主要出现在河南中南部及湖北北部地区,此期是积冰范围最大、强度最强的过程,除了伏牛山以北崤山一带仍维持高的积冰厚度外,河南南部信阳一带也出现积冰厚度中心,最大厚度可达 35~40 mm。

由于没有连续的、大面积的观测资料,模拟的积冰厚度的时间演变很难得到证实,但从气象部门监测到发生冰冻天气的站点(图 8f,红色方框),模拟积冰厚度的空间演变与观测大体符合。同时,河南

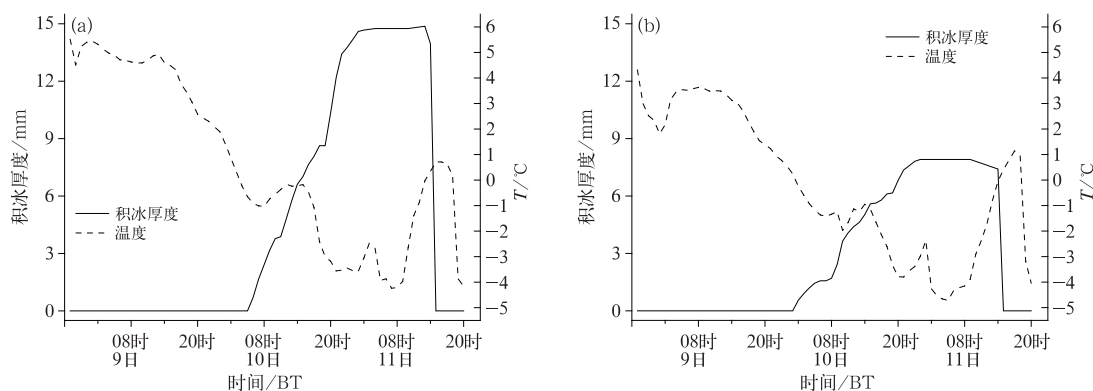


图 6 漯河(a)、许昌(b)站点积冰厚度及温度变化时间序列图
Fig. 6 Time series of accumulated ice thickness and temperature
at Luohe (a) and Xuchang (b)

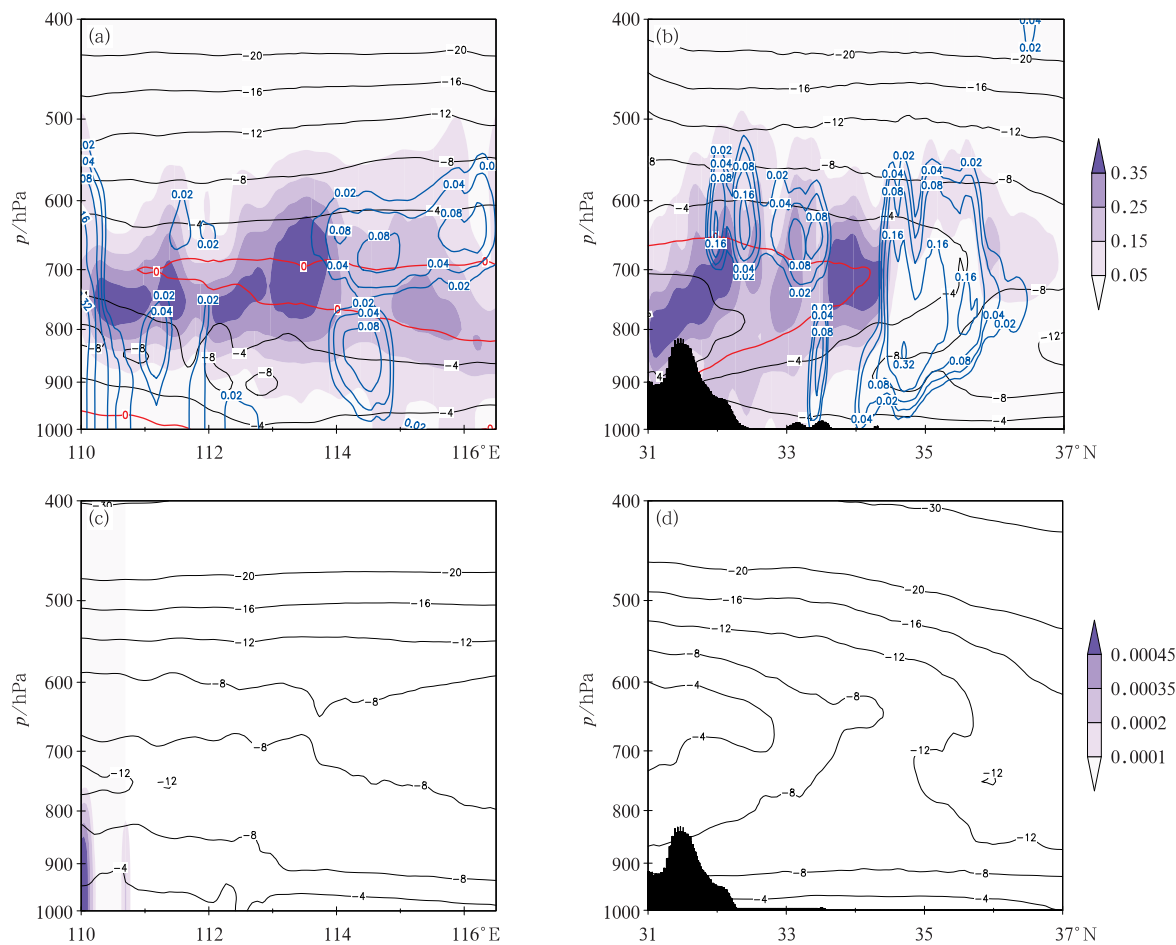


图 7 2010 年 2 月 10 日 15 时(a,b)和 11 日 02 时(c,d)模拟温度场(等值线,单位:℃)和水成物(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)分布的纬向(a,c)和经向(b,d)垂直剖面图
(红色等值线包围的区域为 $>0^\circ\text{C}$ 的逆温区;蓝色等值线为固态水成物,包括冰晶、雪、霰)

Fig. 7 Simulated height-zonal (a, c) and height-meridional (b, d) section of temperature (isoline, unit: $^\circ\text{C}$) and hydrometeors (shaded area, unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) at 15:00 BT 10 (a, b) and 02:00 BT 11 (c, d) February 2010
(Inversion area above 0°C is within the red contour area, blue contours are solid hydrometeors, including ice crystals, snow and graupel)

省国家电网提供了 110 kV 以上线路 8 个站点 9—11 日出现电线积冰厚度的实际观测数据,对比表 1 中积冰出现的时间,模拟积冰出现的时间与观测吻合;模拟的电线最大积冰厚度在开封、许昌、漯河及周口等地区,与观测值较为接近(表 1)。

2.5 误差分析

结合图 6、图 7 及表 1 可以看出,对于开封、许昌、漯河及周口等地区而言,积冰厚度计算误差与观测值较接近,证明积冰计算模型在河南部分地区模拟效果较好。而该模型在信阳及驻马店等地的模拟

值偏大。造成误差的原因可能有几方面:(1)积冰 Jones 模型所造成的误差,它要求冻雨发生时降水量阈值在 $0 \sim 1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (赵德龙,2010),而观测值是 24 h 降水,它的平均值掩盖了部分出现冻雨的降水量;(2)对风速的模拟值略大于观测风速,较大的风速会导致模拟积冰厚度偏大(王守礼,1994);(3)模拟时假定风向与电线走向呈 90° ,也即模拟出的积冰厚度为最大积冰厚度,虽然河南大部分地区电线走向以东西走向为主,与风向夹角 $>45^\circ$,但真正与风向夹角为 90° 的很少,模拟的最大积冰厚度必然高于实际观测的值(张浬和何青,2016;刘春城和

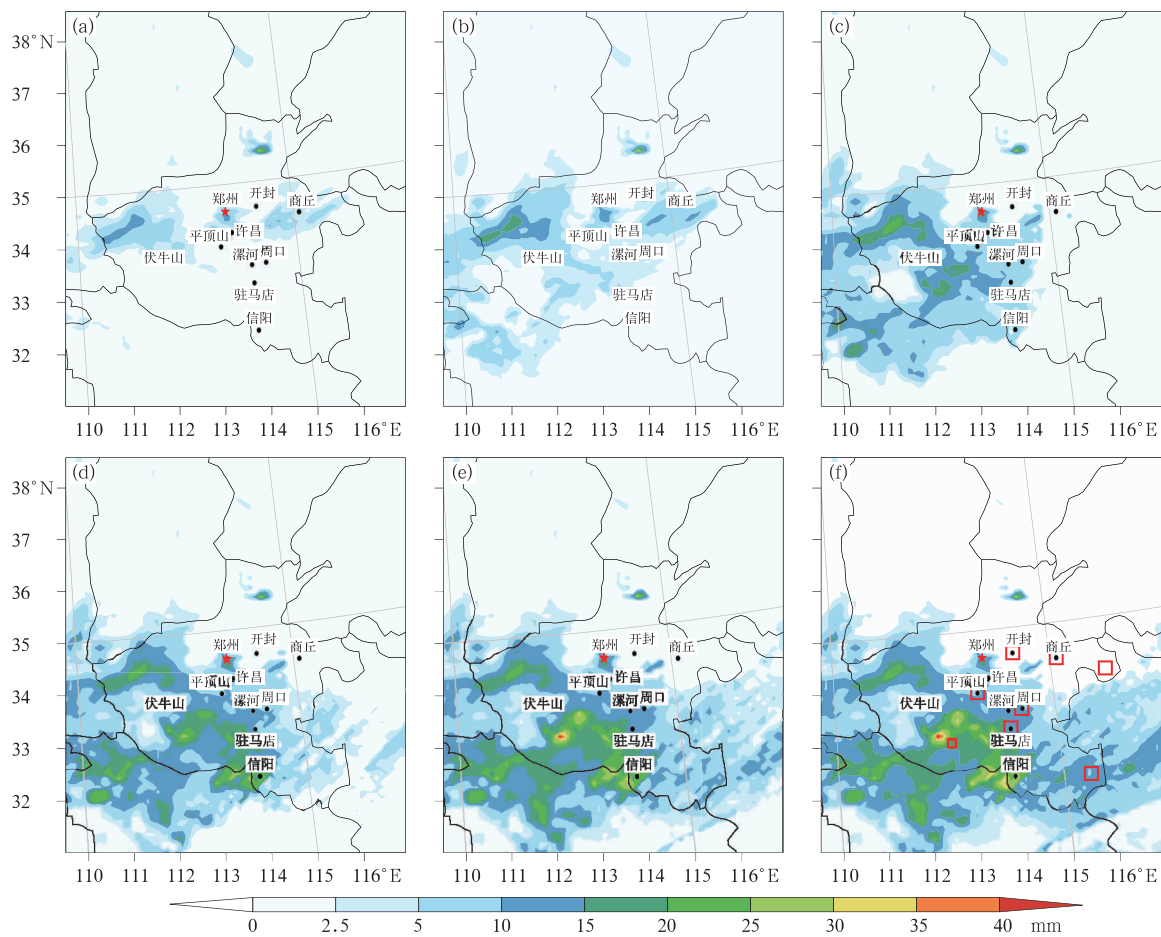


图 8 2010 年 2 月 10 日 02 时至 11 日 08 时最大积冰厚度动态模拟值
(a)10 日 02 时, (b)10 日 08 时, (c)10 日 14 时, (d)10 日 20 时,
(e)11 日 02 时, (f)11 日 08 时
(红色方框为冰冻现象出现点)

Fig. 8 Simulated maximum ice thickness from 02:00 BT 10 to 08:00 BT 11 February 2010
(a) 02:00 BT 10, (b) 08:00 BT 10, (c) 14:00 BT 10, (d) 20:00 BT 10,
(e) 02:00 BT 11, (f) 08:00 BT 11
(Red box shows stations with freezing events)

表 1 2010 年 2 月 9—11 日电线积冰厚度观测与模拟值及误差
Table 1 Observed and simulated values of wire ice accumulation
and their errors in 9—11 February 2010

区域	区域中心经纬度	日期	积冰厚度/mm		误差/mm
			观测	模拟	
开封	34.46°N, 114.23°E	9 日	15	12.4	−2.6
平顶山	33.77°N, 113.18°E	10 日	5	9.2	4.2
许昌	34.01°N, 113.51°E	9 日	8	7.9	−0.1
漯河	33.35°N, 114.00°E	10—11 日	15	14.9	−0.1
商丘	34.27°N, 115.40°E	10 日	3	6.6	3.6
信阳	32.08°N, 114.03°E	11 日	4	24.8	20.8
周口	33.37°N, 114.37°E	10 日	15	10.3	−4.7
驻马店	33.00°N, 114.01°E	10 日	5	14.1	9.1

刘佼,2011);(4)冻雨的产生和发展还受复杂地形等因素的影响,如对山地地形模拟精度较粗,模拟的温度、降雨与风场等与实际有较大的误差。

3 结论与讨论

本文利用 WRF 模式及 Jones 积冰厚度计算模型对河南省 2010 年 2 月 8—11 日的电线积冰现象进行一次模拟分析,结果如下:

(1) 9—11 日,受北方较强冷空气南下以及南方暖湿气流共同影响,冷暖气团在河南中南部地区交汇,同时受高空槽脊影响,该地产生了较强的逆温层,满足了冻雨发生的条件,河南地区产生了大范围冻雨。

(2) 利用 WRF 模式模拟的 24 h 降雨范围与观测数据在范围上大致吻合,但模拟降水中心强度偏大,积冰发生地区的模拟降水量偏小。模拟的 10 m 高度风向、风速,模拟结果大多在 $10\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向以东北风为主,与观测资料较一致。

(3) 利用耦合了 Jones 积冰模型的 WRF 模式,对河南省该次电线积冰过程进行了模拟。模拟的电线积冰厚度动态变化显示,当地面温度降低到 0°C 以下,积冰出现,随着温度的降低,积冰厚度快速增长,而当地面温度稳定达到 0°C 以上,积冰快速融化。在积冰增长及维持阶段,垂直方向温度与水合物的模拟结果显示高低空配置与积冰厚度的变化趋势相吻合。空间最大积冰厚度演变显示,积冰首先出现在伏牛山以北地区,随时间推移,积冰向伏牛山外围的东南部扩展。模拟的范围和积冰厚度演变大体上与观测值吻合,证明该模式可用于河南地区的积冰预测。

(4) 虽然耦合了 Jones 积冰模型的 WRF 模式在河南部分地区模拟效果较好,但在部分地区仍存在模拟值大于观测值的现象,地形模拟精度较粗、模拟的风速偏大、风向与电线夹角理想化以及积冰 Jones 模型阈值范围较小等因素是造成部分地区误差较大的原因。

参考文献

邓芳萍,康丽莉,姜瑜君,等,2017. 基于常规气象资料的小时标准冰厚模型及验证[J]. 应用气象学报,28(2):142-156. Deng F P, Kang L L, Jiang Y J, et al, 2017. An hourly standard ice thickness model using conventional meteorological data with its validation[J]. J Appl Meteor Sci, 28(2):142-156(in Chinese).

胡毅,2008. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术,34(2):215-219. Hu Y, 2008. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. High Voltage Eng, 34(2):215-219(in Chinese).

蒋兴良,易辉,2002. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京:中国电力出版社. Jiang X L, Yi H, 2002. Icing and Protection of Transmission Lines[M]. Beijing: China Electric Power Press(in Chinese).

康丽莉,邓芳萍,岳平,等,2017. 一种浙江省冻雨落区的推算方法[J]. 气象,43(6):756-761. Kang L L, Deng F P, Yue P, et al, 2017. A new method of calculating falling zone of freezing rain in Zhejiang[J]. Meteor Mon, 43(6):756-761(in Chinese).

李庆峰,范峥,吴穹,等,2008. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术,32(9):33-36. Li Q F, Fan Z, Wu Q, et al, 2008. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power Syst Technol, 32(9):33-36(in Chinese).

刘春城,刘佼,2011. 输电线路导线覆冰机理及雨凇覆冰模型[J]. 高电压技术,37(1):241-248. Liu C C, Liu J, 2011. Ice accretion mechanism and glaze loads model on wires of power transmission lines[J]. High Voltage Eng, 37(1):241-248(in Chinese).

钱之银,耿翠英,李颖,2008. 超高压输电线路覆冰倒塔机理分析[J]. 高电压技术,34(11):2495-2497. Qian Z Y, Geng C Y, Li Y, 2008. Analysis of ice-covered tower falling mechanism on UHV transmission lines[J]. High Voltage Eng, 34(11):2495-2497(in Chinese).

孙建华,赵思雄,2008. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析[J]. 气候与环境研究,13(4):368-384. Sun J H, Zhao S X, 2008. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008[J]. Climatic Environ Res, 13(4):368-384(in Chinese).

陶祖钰,郑永光,张小玲,2008. 2008 年初冰雪灾害和华南准静止锋[J]. 气象学报,66(5):850-854. Tao Z Y, Zheng Y G, Zhang X L, 2008. Southern China quasi-stationary front during ice-snow disaster of January 2008[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):850-854(in Chinese).

王凌,高歌,张强,等,2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象,34(4):95-100. Wang L, Gao G, Zhang Q, et al, 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008 I: climatic features and its impact[J]. Meteor Mon, 34(4):95-100(in Chinese).

王守礼,1994. 影响电线覆冰因素的研究与分析[J]. 电网技术,18(4):18-24. Wang S L, 1994. Study and analysis of the factors affecting wire ice coating[J]. Power Syst Technol, 18(4):18-24(in Chinese).

王晓君,马浩,2011. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展,26(11):1191-1199. Wang X J, Ma H, 2011. Progress of application of the Weather Research and Forecast (WRF) model in China[J]. Adv Earth Sci, 26(11):1191-1199(in Chinese).

- 王晓兰,李象玉,黎祖贤,等,2006.2005年湖南省特大冰冻灾害天气分析[J].气象,32(2):87-91. Wang X L, Li X Y, Li Z X, et al, 2006. Analysis of freezing-hazard event in 2005 in Hunan Province[J]. Meteor Mon, 32(2):87-91(in Chinese).
- 吴古会,彭芳,崔庭,等,2012.2011年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析[J].气象,38(3):291-299. Wu G H, Peng F, Cui T, et al, 2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011[J]. Meteor Mon, 38(3):291-299(in Chinese).
- 叶成志,吴贤云,黄小玉,2009.湖南省历史罕见的一次低温雨雪冰冻灾害天气分析[J].气象学报,67(3):488-500. Ye C Z, Wu X Y, Huang X Y, 2009. A synoptic analysis of the unprecedented severe event of the consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province[J]. Acta Meteor Sin, 67(3):488-500(in Chinese).
- 尹宪志,任余龙,杨子和,等,2013.华家岭2008年电线积冰的变化特征与气象条件分析[J].干旱气象,31(3):530-534, 549. Yin X Z, Ren Y L, Yang Z H, et al, 2013. The variation of wire icing in Huajialing in 2008 and analysis of its meteorological conditions [J]. J Arid Meteor, 31(3):530-534, 549(in Chinese).
- 苑吉河,蒋兴良,易辉,等,2004.输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J].高电压技术,30(1):6-9. Yuan J H, Jiang X L, Yi H, et al, 2004. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Eng, 30(1):6-9(in Chinese).
- 张瞰,何青,2016.输电线路覆冰时冻结系数的影响因素研究[J].华北电力大学学报,43(2):50-55. Zhang J, He Q, 2016. Study on the influencing factors of the frozen coefficient under icing on the transmission lines[J]. J North China Electric Power Univ, 43(2):50-55(in Chinese).
- 赵德龙,2010.中国南方地区冻雨的大气结构观测与数值模拟研究[D].南京:南京信息工程大学. Zhao D L, 2010. Observation and numerical simulations of atmospheric structure of freezing rain in southern China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 赵思雄,孙建华,2008.2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J].气候与环境研究,13(4):351-367. Zhao S X, Sun J H, 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January—February 2008[J]. Climatic Environ Res, 13(4):351-367(in Chinese).
- 周光歧,1996.1987年12月22日冻雨分析[J].新疆气象,19(5):17-19. Zhou G Q, 1996. Analysis of frozen rain on December 22, 1987[J]. Xinjiang Meteor, 19(5):17-19(in Chinese).
- 周后福,张苏,张美根,等,2004.江淮地区雨淞天气形势及其垂直结构特征[C]//大气物理、云雾物理人工影响天气技术经验交流及学术研讨会论文集.合肥:安徽省气象学会. Zhou H F, Zhang S, Zhang M G, et al, 2004. Weather situation and vertical structural characteristics of glaze in the Yangtze-Huaihe Region[C]// Proceedings of The Exchange of Technical Experience and Academic Seminar on Atmospheric Physics, Cloud and Fog Physics and Weather Modification. Hefei: Anhui Meteorological Society(in Chinese).
- 周悦,周月华,牛生杰,等,2014.云中积冰过程微物理参量演变规律的数值模拟[J].大气科学学报,37(4):441-448. Zhou Y, Zhou Y H, Niu S J, et al, 2014. Numerical simulations of microphysical properties evolution of the in-cloud icing process[J]. Trans Atmos Sci, 37(4):441-448(in Chinese).
- 宗志平,马杰,2011.2008年初冻雨强度变化以及与逆温层特征之间的关系[J].气象,37(2):156-160. Zong Z P, Ma J, 2011. The relationship between the strength variability of freezing rain and the character of inversion in the beginning of 2008[J]. Meteor Mon, 37(2):156-160(in Chinese).
- Brooks C F, 1920. The nature of sleet and how it is formed[J]. Mon Wea Rev, 48(2):69-72.
- Chaine P M, Casfonguay G. 1974. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors[R]. Toronto, Canada: Environment Canada.
- Cortinas Jr J V, Bernstein B C, Robbins C C, et al, 1917. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada, 1976—90[J]. Wea Forecasting, 19(2):377-390.
- Farzaneh M, Savadjiev K, 2005. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Trans Power Deliv, 20(2):1080-1087.
- Houston T G, Changnon S A, 2007. Freezing rain events: a major weather hazard in the conterminous us[J]. Nat Hazards, 40(2):485-494.
- Imai I, 1953. Studies on ice accretion[J]. Res Snow Ice, 3(1):35-44.
- Jones K F, 1998. A simple model for freezing rain ice loads[J]. Atmos Res, 46(1-2):87-97.
- Lenhard R W, 1995. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires[J]. Bull Amer Meteor Soc, 36(3):1-5.
- Ramer J, 1993. An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Aviation Weather Systems. Vienna, VA: American Meteorology Society:227-230.
- Sakamoto Y, 2000. Snow accretion on overhead wires[J]. Philos Trans: Math, Phys Eng Sci, 358(1776):2941-2970.
- Stewart R E, 1992. Precipitation types in the transition region of winter storms[J]. Bull Amer Meteor Soc, 73(3):287-296.
- Sun J H, Zhao S X, 2009. The impacts of multiscale weather systems on freezing rain and snowstorms over southern China[J]. Wea Forecasting, 25(2):388-407.